

Etanol, álcoolquímica e biorrefinarias

Valéria Delgado Bastos

<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>

ETANOL, ALCOOLQUÍMICA E BIORREFINARIAS

Valéria Delgado Bastos*

** Economista do BNDES. A autora agradece os comentários e sugestões do professor Carlos Henrique Brito Cruz, diretor científico da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), a Roberto Zurli Machado, superintendente da Área de Insumos Básicos do BNDES, e a Cynthia Moreira, chefe do Departamento de Indústrias Químicas do BNDES. Agradece também a Eduardo Fernandes, gerente do Departamento de Indústrias Químicas, pelas discussões e o incentivo de estudar o tema. Eventuais erros e omissões remanescentes são, entretanto, de responsabilidade exclusiva da autora.*

ALCOOLQUÍMICA

Resumo

Por motivos econômicos, geopolíticos e ambientais, as atenções do mundo se voltam para fontes alternativas de energia, em especial para o etanol. O foco de governos, empresas e pesquisadores não está mais restrito ao etanol combustível, mas incorpora o etanol grau químico, fonte de matérias-primas para a fabricação de produtos químicos, e leva à redescoberta da alcoolquímica. O estabelecimento de metas extremamente ambiciosas para aumento do consumo do etanol nos próximos anos, principalmente nos países desenvolvidos, requer um aumento substancial da produção de etanol e, nesse sentido, estimula a pesquisa e o desenvolvimento de novas matérias-primas para o etanol, como a biomassa lignocelulósica, e a construção de biorrefinarias integradas, um conceito análogo ao das refinarias de petróleo. Esses dois temas constam dos planos dos governos da União Européia e dos Estados Unidos, em meio a preocupações de natureza ambiental e de segurança energética. No Brasil, a partir da trajetória virtuosa de trinta anos do etanol combustível, as atenções também se voltam para o etanol químico e a alcoolquímica, como caminhos para a ampliação da produção química do país frente às limitações de ampliação da oferta doméstica de nafta petroquímica. As iniciativas nacionais contemplam o desenvolvimento de novas tecnologias de etanol com base na biomassa lignocelulósica proveniente de resíduos da produção do etanol da cana-de-açúcar e a instalação de biorrefinarias, mas dentro de um enfoque e de uma estratégia própria decorrente da especificidade da cana em termos de custos e balanço energético positivo.

Introdução

O etanol desperta de modo crescente a atenção de pesquisadores, empresas e governos. Isso decorre das pressões de preços e perspectivas de esgotamento das fontes não-renováveis de combustíveis fósseis, assim como de preocupações de natureza ambiental, relacionadas à emissão de substâncias que comprometem o meio ambiente.

As ações governamentais dirigidas ao etanol orientam-se inicialmente por preocupações na área de energia e combustíveis. Nesse sentido, reproduzem as ações do governo brasileiro de meados dos anos 1970, quando a crise do petróleo levou à incorporação do etanol (ou álcool) em nossa matriz energética, tornando-o uma alternativa efetiva à gasolina.

Mesmo com a interrupção da trajetória virtuosa do etanol no início da década de 1990 em resposta à queda nos preços relativos do petróleo e aos problemas de natureza fiscal do governo, que eliminaram os subsídios e levaram a uma perda de espaço relativo para a gasolina, um novo ímpeto foi garantido ao etanol combustível graças aos novos veículos bicomcombustíveis (*flex fuel*).

No mundo, o recente retorno aos aumentos no preço do petróleo, as perspectivas de esgotamento das reservas, os riscos geopolíticos decorrentes da dependência do petróleo de países politicamente instáveis e os compromissos mais sólidos com a questão ambiental desde a assinatura do Protocolo de Quioto fizeram renascer a atenção nas fontes alternativas de energia. O biodiesel, a célula combustível de hidrogênio e, principalmente, o etanol passaram a constar de forma definitiva da agenda dos governos e das políticas de praticamente todos os países.

Nesse novo cenário, as atenções voltadas para o etanol não estão mais restritas ao etanol combustível, mas incorporam o etanol grau químico, fonte de matérias-primas (químicas) utilizadas em diversos setores da indústria de transformação. A álcoolquímica é o segmento da indústria química que utiliza o álcool etílico como matéria-prima para fabricação de diversos produtos químicos. Com efeito, boa parte dos produtos químicos derivados do petróleo pode ser obtida também do etanol, em particular o eteno, matéria-prima para resinas, além de produtos hoje importados derivados do etanol, como os acetatos e o éter etílico. Da mesma forma, muitos produtos químicos eram obtidos de outras fontes fósseis, como o carvão, até serem suplantados pela petroquímica como fonte principal de ma-

térias-primas quando o modelo de produção americano calcado no petróleo barato tornou-se hegemônico. Hoje, a indústria química mundial obtém mais de 90% da matéria-prima para síntese de moléculas orgânicas com base no petróleo. No futuro, por razões econômicas, a alcoolquímica poderá vir a substituir a petroquímica e o etanol poderá assumir o lugar do petróleo como fonte de matérias-primas.

No panorama que se abre para a consolidação mundial do etanol (químico e combustível), dois aspectos centrais devem ser considerados. Por um lado, o desenvolvimento de novas tecnologias de produção com base na biomassa e, por outro, o conceito de biorrefinarias. Esses aspectos são considerados nos recentes planos dos governos da União Européia e dos Estados Unidos (EUA), que contemplam até medidas específicas de estímulo à construção de refinarias baseadas no etanol.

O etanol é o álcool etílico (C_2H_5OH) produzido desde os tempos antigos pela fermentação dos açúcares encontrados em produtos vegetais (cereais, beterraba e cana). Ainda hoje, boa parte do etanol industrial é feita por meio da fermentação, embora também seja feita sinteticamente de fontes como o eteno derivado do petróleo. O novo conceito de etanol (ou bioetanol) corresponde a sua fabricação utilizando como matéria-prima a biomassa lignocelulósica. Essas matérias-primas provenientes de sobras e resíduos de produtos naturais (como o sabugo e a palha do milho, o bagaço, as pontas e as palhas da cana-de-açúcar) e o conceito de biorrefinarias emergem como fundamentais para a expressiva ampliação pretendida da produção de etanol, que hoje esbarraria em limitações para expansão da área plantada, seja por competir com a produção de alimentos, seja pelo nível de seus preços relativos frente ao petróleo e aos próprios alimentos. É justamente por disputar matéria-prima e depender das cotações de preços do açúcar (no caso da cana) e dos alimentos (no caso do amido dos cereais), que ainda não foi possível o desenvolvimento de um mercado estável para o etanol. Nos EUA, por exemplo, os impactos do etanol já são sentidos no preço no mercado futuro do milho, que saltou de US\$ 2,51 por bushel, no contrato de setembro de 2006, para US\$ 3,26, em setembro de 2008.

A produção de etanol com base na biomassa lignocelulósica utiliza processos químicos (empregando ácidos) ou da biotecnologia moderna (empregando enzimas) para a quebra de moléculas de celulose e produção de açúcares, para então produzir o etanol por meio de processos fermentativos alcoólicos da biotecnologia convencional. O uso da biotecnologia para converter celulose em etanol abre grandes perspectivas para as empresas que atuam no desenvolvimento de enzimas. Com isso, abre espaço para se tornar, também, foco da atenção dos financistas de Wall Street.

Especialistas acreditam que as biorrefinarias possam vir a constituir uma indústria-chave do século XXI, responsável até mesmo por uma nova revolução industrial, em virtude da importância das tecnologias que empregam e dos efeitos sobre o paradigma industrial. Essas tecnologias são baseadas na utilização de toda a planta (todo o complexo de biomassa) e na integração de processos tradicionais e modernos [Kamm *et al* (2005)]. Muitos consideram a conversão desses materiais um dos maiores desafios dos próximos cinquenta anos, em que os líderes serão as firmas e economias que conseguirem desenvolver tecnologias alternativas à economia do petróleo [Chemical Engineering (2006)].

No Brasil, além do êxito alcançado pelo etanol combustível, também começa a surgir um interesse no etanol químico e nota-se a redescoberta da alcoolquímica, implantada no país na década de 1920, mas abandonada quando da consolidação da petroquímica. No cenário atual, isso decorre, em grande medida, das limitações para expansão da produção química por causa das remotas perspectivas de aumento da oferta doméstica de nafta petroquímica (hoje restrita a algo entre 60% e 70% do consumo do país) e a escalada de preços do produto importado. Além disso, há potencial do país para tornar-se grande exportador de etanol para o mundo, nos próximos anos. No entanto, ainda que seja indiscutível a consagração do etanol combustível e sejam grandes as vantagens comparativas de custo do etanol da cana-de-açúcar, a produção brasileira já foi alcançada pela norte-americana, em 2005, e há riscos adicionais de perda de posição relativa quando os países desenvolvidos tiverem sucesso na utilização da gama completa de material celulósico na produção de etanol. A meta da política norte-americana é tornar o etanol celulósico custo-competitivo já em 2012. Alan MacDiarmid, prêmio Nobel de Química, acredita que no prazo máximo de três anos o Brasil perderá a vantagem tecnológica na produção de etanol [Inovação Unicamp (2005)].

Este trabalho pretende discutir os desafios e perspectivas do etanol químico e da alcoolquímica como alternativa para expansão da produção química brasileira, à luz da experiência internacional, das novas tecnologias e do conceito de biorrefinaria. A segunda seção sumariza a trajetória do etanol combustível no Brasil e as políticas públicas mobilizadas. A terceira seção descreve a importância que o etanol vem assumindo no mundo, com destaque para produção e políticas governamentais dos Estados Unidos e da União Européia. A quarta seção apresenta as perspectivas das novas tecnologias da biomassa e das biorrefinarias, com vistas ao desenvolvimento de uma indústria de etanol competitiva, não mais restrita ao seu uso como combustível alternativo, mas também como fonte de matérias-primas químicas. Na última seção são apresentadas as considerações finais do trabalho e a importância de políticas públicas que reforcem a competitividade do etanol brasileiro no novo cenário mundial.

A Experiência Brasileira do Etanol Combustível e as Limitações da Alcoolquímica

O Brasil ocupa posição destacada na produção mundial de etanol, confirmando a tradição na cultura de cana-de-açúcar. A cana é uma das principais culturas, cultivada em mais de cem países, principalmente nas nações em desenvolvimento, embora cerca de três quartos da produção mundial esteja concentrada em oito países. O Brasil é o maior produtor mundial, seguido por Índia, China, Tailândia e Paquistão. Brasil e Índia respondem por metade da cana produzida no mundo. Na última safra, a produção brasileira foi de mais de 425 milhões de toneladas, em uma área plantada de 5,2 milhões de hectares, que representa menos de 1% das áreas cultiváveis.

A produção está concentrada no Centro-Sul (85% da produção brasileira) e o Estado de São Paulo responde por 60% da produção de cana. A cultura é semiperene¹ e a produção é trabalho-intensiva, com cerca de 80% cortada a mão (em São Paulo, a colheita é mecanizada em 30% da área plantada). O faturamento do setor está em torno de R\$ 40 bilhões, dividido mais ou menos eqüitativamente na produção de açúcar e de álcool (Gráfico 1). Contudo, essa repartição do uso da cana é variável, dependendo dos preços relativos e perspectivas dos dois mercados, cujas dinâmicas são bastante diferenciadas, uma vez que dois terços da produção brasileira de açúcar é exportada, enquanto a produção de álcool é quase inteiramente (85%) dirigida ao mercado interno, embora as exportações venham crescendo nos últimos anos.

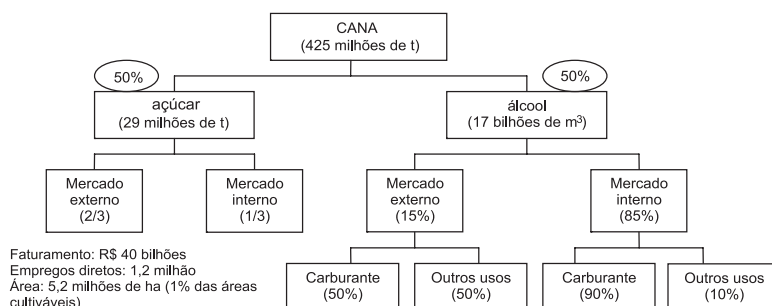
A produção é bastante pulverizada, feita em usinas, usinas com destilarias anexas e destilarias autônomas. As usinas fabricam apenas açúcar, as destilarias autônomas, apenas álcool, enquanto as usinas com destilarias anexas fabricam os dois produtos. No total, são 336 unidades produtoras,² a maioria de pequeno porte.³ As principais produtoras são Cosan, São Martinho, Vale do Rosário, Copersucar, Crystalsev, Nova América e Itamarati, embora novos

¹Isso significa que após o plantio a cana pode ser cortada várias vezes antes de replantada, em ciclo produtivo de cerca de cinco anos.

²Na safra 2003/2004, por exemplo, as unidades produtoras de álcool somavam 284 usinas, em um universo de 320 unidades [CGEE (2005)].

³Tanto as destilarias autônomas quanto as anexas surgiram após o Proálcool. Antes, a produção de álcool era residual e tinha como matéria-prima o melaço, ou mel final, subproduto da fabricação de açúcar. Com o crescimento das exportações de açúcar, entretanto, a maioria das destilarias autônomas foi convertida em usinas de açúcar e álcool; a participação das autônomas caiu de 48% das unidades produtoras, em 1990, para 32%, em 2002 [CGEE (2005)].

Gráfico 1
Cadeia Sucroalcooleira no Brasil



Fonte: Unica.

players, como Cargill, Tereos, Evergreen, Louis Dreyfus e Kidd & Company, venham ganhando espaço no setor. Cabe lembrar, também, que na década de 1990 deu-se o início dos investimentos de grupos internacionais, em movimentos de fusões e aquisições, além de intenso deslocamento de firmas tradicionais do Nordeste para São Paulo, Minas Gerais e Goiás.⁴

As unidades processadoras moem, em média, 1 milhão de toneladas de cana por safra (1,5 milhão de toneladas, no Centro-Sul). A média diária da produção de álcool é de cerca de 400 mil litros (expansão expressiva frente aos 120-180 mil litros/dia do início do Proálcool). No caso das destilarias, a produção é de cerca de 85 litros de etanol anidro por tonelada de cana. As usinas anexas têm produção em torno de 71 kg de açúcar e 42 litros de etanol para cada tonelada de cana [CGEE (2005)].

A produção, em 2006, é estimada entre 16 e 17 bilhões de litros (capacidade de produção de 18 bilhões de litros/ano), para um consumo de 13 a 14 bilhões de litros [*Valor Econômico* (4.8.2006)]. A Frost&Sullivan, empresa de consultoria americana, estima aumento da produção brasileira para 30 bilhões de litros anuais, em 2012,⁵ com crescimento das exportações para os mercados norte-americano e japonês. A F. O. Licht, empresa alemã de consultoria em *commodities*, prevê a liderança brasileira na exportação de etanol, de 6 bilhões de litros em 2015, principalmente para Ásia e Europa (em função da crescente demanda por energia limpa, estima-se um grande déficit de etanol na Europa em 2015). Atualmente, o Brasil é um dos poucos países que geram excedentes exportáveis de etanol, além do pequeno comércio intra-União Européia [IPC (2006)].

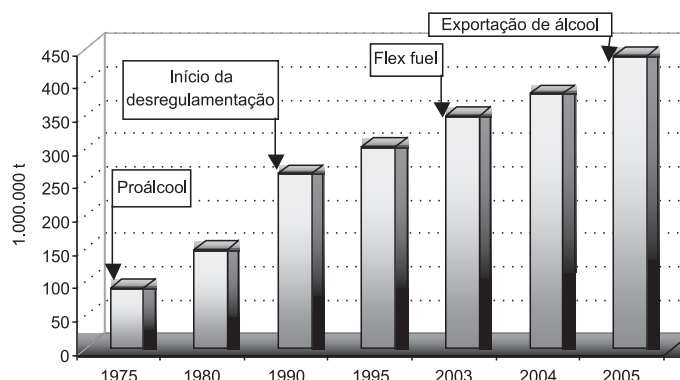
De fato, a evolução da produção brasileira de cana-de-açúcar a partir da década de 1970 esteve ligada aos principais eventos relacionados ao etanol e à política pública para o setor (Gráfico 2). O início dos investimentos na produção do álcool combustível ocorreu após a crise do petróleo e as dificuldades no mercado de açúcar, com forte queda em seu preço internacional a partir de 1974. Inicialmente, pela adição de álcool anidro na gasolina e, desde o começo da década de 1980, por seu uso direto em veículos movidos a álcool hidratado.

Para reduzir a importação de petróleo – na época, 90% da gasolina consumida era importada – e oferecer um mercado alternativo ao açúcar, foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), por meio do Decreto 76.593/75, que inicialmente contemplava o estabelecimento da mistura obrigatória do etanol à gasolina (cerca de 20%), empréstimos com juros baixos e garantias para construção de novas unidades, fixação do preço da gasolina em nível que conferia vantagem competitiva ao etanol, investimentos da Petrobras para distribuição de etanol pelo país, além da propaganda oficial

⁴O deslocamento ocorreu apesar do subsídio aos produtores do Norte e Nordeste com vistas a equalizar seus custos de produção [Martins-Filho et al (2006)], por causa de tributos estaduais (ICMS).

⁵De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, foram instaladas 12 novas destilarias em 2006 e outras 16 entrarão em funcionamento em 2007. Há 89 projetos de expansão, dos quais 31 em andamento, com investimentos totais de US\$ 13 bilhões [Inovação Unicamp (2006a)].

Gráfico 2
Evolução da Produção de Cana e Marcos do Etanol no Brasil



Fonte: Unica.

para estimular o uso do álcool. O resultado foi o aumento em mais de 500% da produção de etanol entre 1975 e 1979.

A segunda fase do Programa, após o segundo choque do petróleo, em 1979, contemplou a fabricação de veículos movidos a álcool hidratado. Para estimular a migração dos consumidores, foram oferecidos diversos incentivos, como fixação do preço do álcool em nível inferior ao da gasolina (65% em 1980 e 59% em 1982), redução de impostos incidentes sobre a venda dos carros a álcool e aumento dos impostos dos carros movidos a gasolina, além de IPVA reduzido.

O auge do Proálcool foi alcançado na década de 1980, quando a política de preços tornou o álcool bem mais barato do que a gasolina, levando a produção de etanol a mais do que triplicar entre 1979 e 1985 (em 1984, os carros a álcool respondiam por 94,5% da produção das montadoras). A indústria do álcool substituiu, desde 1976, mais de 1,44 bilhão de barris de petróleo e a economia de divisas com a substituição do petróleo foi de cerca de US\$ 120 bilhões, entre 1979 e 2004.

⁶Martines-Filho et al (2006) ressaltam, entre as medidas de desregulamentação do setor, além da eliminação dos subsídios e extinção do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), o fim da obrigatoriedade da compra do etanol combustível produzido pela Petrobras, em 1987, e a desregulamentação de preços, a partir de 1997, primeiro do álcool anidro e, desde 1999, do álcool hidratado e da cana.

O abrandamento da crise do petróleo e a queda de seus preços, aliados ao aumento da cotação internacional do açúcar e maior rentabilidade do mercado de exportação, acabaram resultando na queda da produção do etanol, o que gerou problemas de abastecimento, uma vez que continuava a produção dos carros a álcool. Em 1990, o país foi obrigado a importar etanol e utilizar metanol na mistura com a gasolina. Esses problemas e as políticas de ajustamento fiscal acabaram resultando na extinção do Proálcool. Apenas táxis e veículos para locação continuaram fabricados com motor a álcool, embora a obrigatoriedade da mistura à gasolina tenha sido mantida.⁶

Uma nova onda de dinamismo só teve início com a introdução dos veículos bicomcombustíveis (*flexible fuels*) no mercado brasileiro no início da década de 2000, incentivados pela concessão do mesmo tratamento tributário preferencial dos carros a álcool (14% de imposto sobre vendas, frente aos 16% dos carros não-movidos a álcool).⁷

Desse modo, a extinção dos subsídios à produção do etanol, no início da década de 1990, não significou a completa eliminação da intervenção estatal, uma vez que o governo continuou a encorajar a indústria, manteve a obrigatoriedade da adição do álcool à gasolina (ampliada de 20% para 25% em 1993, embora recentemente reduzida àquele percentual) e estimulou o fornecimento de veículos *flex fuel* (hoje, mais de 80% dos carros novos; 350 mil unidades vendidas em 2004). Há atualmente cerca de 3 milhões de veículos movidos a álcool hidratado e o álcool anidro é misturado à gasolina em toda a frota brasileira, de 20 milhões de veículos [CEC (2006)].

De fato, a obrigatoriedade da adição do etanol à gasolina, mantida no país há mais de três décadas, e a manutenção da pequena preferência tributária na compra dos veículos *flex fuel* têm sido os instrumentos efetivos de estímulo governamental, pois oferecem sinais claros de mercado aos produtores. Apesar do crescimento recorde dos preços do etanol no período recente por causa do grande aumento dos preços internacionais do açúcar refinado – ainda que representem, hoje, menos de um terço do que eram em 1975 [Martines-Filho *et al* (2006)] –, o etanol é bastante competitivo, graças às vantagens da agropecuária brasileira, em termos de clima e disponibilidade de terras, salários baixos, tecnologia de produção e políticas públicas adequadas. A adição à gasolina começa a servir de inspiração para as políticas recentes de estímulo ao etanol dos países desenvolvidos, principalmente os Estados Unidos.

Todo esse dinamismo da produção de etanol combustível não se refletiu, entretanto, na indústria alcooolquímica, baseada no álcool etílico (ou etanol grau químico), pois seu consumo pela indústria é pequeno (400 a 500 milhões de litros anuais). Não obstante, a alcooolquímica precedeu a implantação da indústria petroquímica no Brasil em quase quarenta anos, com a produção de cloreto de etila, éter dietílico e ácido acético pela Rhodia. Outros produtos fabricados no país com base no etanol são os derivados acéticos (pela Rhodia e Fonagra/Hoechst), o butanol e a acetona (Usina Victor Sence), o eteno (Eletroteno/Solvay e Union Carbide), o polibutadieno e o 2-etil-hexanol (Elekeiroz do Nordeste) [Wongstchowski (2002)].

Originalmente, o Proálcool chegou a definir um subsídio à produção de álcool no caso dos derivados orgânicos que pudessem ser produzidos alternativamente por rota petroquímica, como o eteno, o acetaldeído, o butanol e o butadieno. Segundo Wongs-

⁷De acordo com Martines-Filho *et al* (2006), a tributação de 52% para a gasolina pura é 58% maior do que a do etanol hidratado. Como o álcool anidro não é tributado, a gasolina com adição (de 13% ou mais) de álcool anidro é beneficiada por uma tributação mais baixa do que o álcool hidratado (a taxa efetiva é de 22% para adição de 20%).

tchowski (2002), o conceito acabou empregado em sentido mais amplo e o subsídio alcançou todos os derivados químicos do álcool. O preço do metro cúbico do álcool usado como insumo na indústria química foi fixado em 35% do preço da tonelada de eteno petroquímico (foram, ainda, estabelecidas cotas da matéria-prima subsidiada, pelo Conselho Nacional do Petróleo – CNP).

No entanto, além da concorrência que se abria em virtude da crescente disponibilidade de nafta petroquímica com a implantação das centrais e a consolidação (mundial) da petroquímica como principal fonte de matérias-primas químicas, os incentivos do Proálcool à alcoolquímica tiveram curta duração. A partir de 1982, o preço do etanol destinado à alcoolquímica foi equiparado ao da nafta petroquímica. Os produtos que também pudessem ser produzidos por rota petroquímica tiveram o preço do litro do álcool fixado em 100% do preço FOB do litro da nafta; os produtos sem rota alternativa petroquímica, em 170% da nafta.

Wongstchowski (2002) destaca a sobrevida à alcoolquímica assegurada pela redução a zero da taxa de contribuição ao Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), que incidia sobre o preço do álcool (e podia alcançar até 12% do preço) quando destinado à fabricação de produtos alcoolquímicos para exportação. Mais uma vez, o incentivo teve curta duração, pois foi eliminado em 1984. Nesse momento, a alcoolquímica resumia-se a empresas que transformavam etanol em eteno ou acetaldeído e às que utilizavam o etanol pela sua função química como álcool (para produção de éteres glicólicos, ésteres e etilaminas). A maior parte dessas unidades alcoolquímicas foi sendo progressivamente desativada, principalmente nas décadas de 1980 e 1990, outras foram convertidas para utilização do eteno e umas poucas continuam operando com base na matéria-prima importada.

O Mundo se Volta para o Etanol

O consumo mundial de gasolina foi de 1,15 trilhão de litros, em 2004, e deverá alcançar 1,7 trilhão de litros, em 2025 [CGEE (2005)]. A maior parte do petróleo consumido diariamente como combustível pelos países desenvolvidos é importada. Por isso, as principais nações buscam a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, com destaque para o etanol.

O etanol é hoje o principal biocombustível utilizado no mundo, embora o biodiesel, que até recentemente era produzido quase exclusivamente pela União Européia, em especial Alemanha, venha ganhando espaço em outras regiões [CEC (2006)]. No total, os biocombustíveis respondem hoje por apenas 2% da energia utilizada [International Energy Agency (2005)], mas seu uso está cada vez mais difundido e a aposta mundial é a ampliação da produção e do consumo do etanol.

O principal uso do etanol é como combustível líquido, misturado à gasolina ou usado como insumo na fabricação de aditivo à gasolina (o ETBE, derivado do petróleo, tem sido proibido pelo risco de contaminação de águas subterrâneas). O uso como combustível (na proporção de 20% a 100%) é praticamente exclusivo do Brasil e dos Estados Unidos, enquanto o uso como aditivo (2% a 10%) ocorre nos EUA, Europa, Índia e China, entre outros países [USDA (2006)].

A substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis tem sido estimulada pelos governos, não apenas em virtude da volatilidade e do aumento dos preços do petróleo, mas pela perspectiva de esgotamento das reservas mundiais dentro de no máximo setenta anos. Não parece haver dúvidas sobre o esgotamento da oferta mundial de fontes fósseis; a incerteza é apenas sobre quando isso ocorrerá [Chemical Engineering (2006)]. Além disso, um volume expressivo de dióxido de carbono (CO_2) é lançado anualmente na atmosfera. Em 2002, 24 bilhões de toneladas métricas foram lançadas pela queima de combustíveis fósseis e, em 2015, essa quantidade deve alcançar 33 bilhões. A queima de um galão de etanol, por seu turno, adiciona pouco carbono à atmosfera, e o montante desprendido no processo é praticamente igual ao absorvido pelas plantas na produção do próximo galão [Technology Review (2006)]. O etanol gera dez vezes mais energia do que consome em sua produção [JCEmail (2006)].

Nos Estados Unidos, a estratégia explicitada nos documentos da política do governo é alcançar a liderança mundial em etanol, por razões ligadas aos preços do petróleo e ao esgotamento das reservas, mas também por aspectos geopolíticos relativos à dependência da importação de países politicamente instáveis e como demonstração de preocupações ambientais, embora o país não tenha aderido ao Protocolo de Quioto⁸ [Inovação Unicamp (2005)]. O país importa cerca de 60% do petróleo que consome e a dependência é crescente, tendo gasto mais de US\$ 250 bilhões em 2005 (35% do valor total das importações e estimativa de alcançar 70% nos próximos vinte anos). Os EUA respondem por 25% do consumo mundial de petróleo, mas mantêm apenas 3% das reservas conhecidas de petróleo (60% estão localizadas em regiões “sensíveis e voláteis” do mundo) [DoE (2006)]. Na União Européia, o aumento dos preços do petróleo, as pressões para redução das emissões de CO_2 ,⁹ o desejo de aumentar a auto-suficiência e a busca de “segurança” energética são as principais motivações apontadas para o apoio aos biocombustíveis [CEC (2006)]. No entanto, apesar das fortes preocupações ambientais e políticas recentes de apoio ao etanol, a produção da União Européia é ainda reduzida, restrita a poucos países (Gráfico 3).

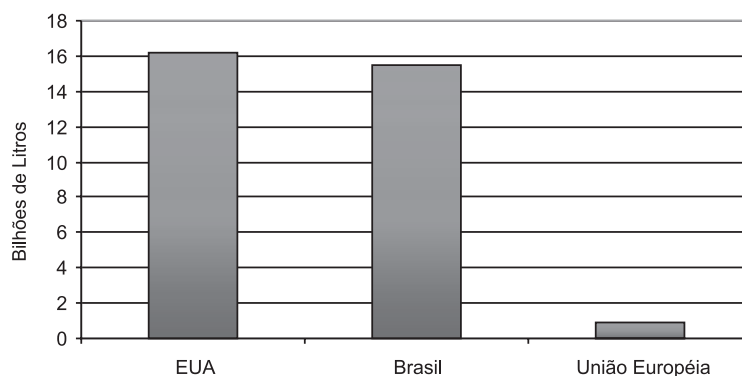
A produção mundial de etanol é de mais de 40 bilhões de litros, concentrada em poucos países. Dez deles responderam por

⁸O Protocolo de Quioto, assinado em 1997 e em vigor desde 2005, definiu mecanismos e metas para os países reduzirem as emissões de gases causadores do efeito estufa em 5,2%, entre 2008 e 2012, frente aos níveis de 1990. Criou, também, um mercado mundial de créditos de carbono, em que os países que não conseguem reduzir suas emissões podem comprar créditos dos países que contribuem para retirar esses gases da atmosfera, como o Brasil, pelas suas florestas e matas, em quantidade superior ao que emitem. O mercado potencial de créditos de carbono é capaz de alcançar € 30 bilhões, em 2007, dos quais 20% caberão ao Brasil. Em 2005, teriam sido comercializadas quase 800 mil toneladas de CO_2 , movimentando € 9,4 milhões. Os Estados Unidos são responsáveis por boa parte das emissões de gases poluentes (36,1% na época do Protocolo e hoje algo em torno de 25%). Ou seja, para compensar a emissão de CO_2 , podem ser apoiados projetos de redução das emissões de gases do efeito estufa com recursos dos certificados de emissões. Através dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, os países desenvolvidos podem investir em projetos (energéticos ou florestais) nos países em desenvolvimento e utilizar os créditos (Reduções Certificadas de Emissões) para reduzir suas obrigações.

⁹O CO_2 emitido pela queima de combustíveis fósseis e desmatamento de florestas é o gás que mais contribui para o efeito estufa e o aquecimento global.

Gráfico 3

Produção de Etanol – 2005
EUA, Brasil e União Européia



Fonte: <www.ebio.org> (junho de 2006).

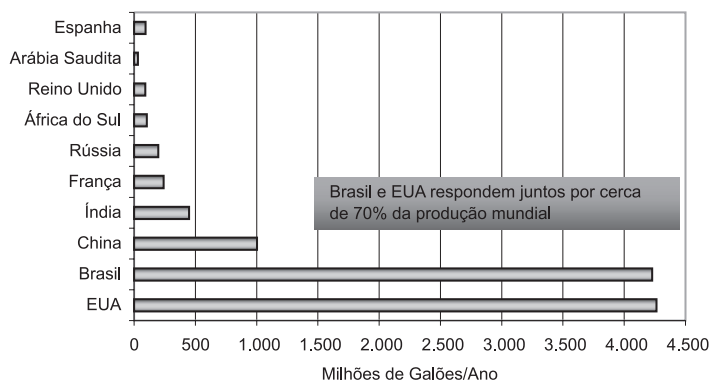
89% da oferta, em 2005, com destaque para Estados Unidos e Brasil, que juntos detêm 70% da produção, seguidos por China e Índia (Gráfico 4). Além da China (que produz etanol principalmente do milho) e da Índia (com base na cana), importantes investimentos estão sendo feitos na Tailândia (com base na cana e na casca de arroz) e no Paquistão (do melaço) para aumento da produção de etanol. A China, entretanto, esbarra em preocupações com segurança alimentar e poderá vir a ser um grande importador do Brasil [CGEE (2005)].¹⁰

A produção de etanol nos Estados Unidos, fabricado de milho, alcançou 16 bilhões de litros (4,3 bilhões de galões), em 2005, o que representou um aumento de 20% em relação ao ano anterior e superou (em 1%) a produção brasileira. O etanol supre apenas 3%

Gráfico 4

Dez Maiores Produtores de Etanol*

(89% da Produção Mundial em 2005)



Fonte: RFA (F.O.Licht).

*Todos os graus de etanol.

¹⁰O governo chinês está promovendo a produção e o uso do etanol combustível, já usado em cinco cidades importantes. Na Índia, o uso é obrigatório desde 2002, mas em poucas regiões. No Japão, segundo maior consumidor mundial de gasolina (64,6 bilhões de litros, em 2004), a mistura facultativa passará a obrigatória com a adição de 3% de etanol [CGEE (2005) e Unica].

do combustível consumido nos EUA, enquanto no Brasil responde por mais de 40% do consumo.¹¹ Esse crescimento da produção norte-americana, com cerca de cem plantas em operação, resultou, em grande medida, de políticas públicas mobilizadas principalmente a partir de 2000 e de fortes subsídios ao setor.

Os Estados Unidos são o maior consumidor mundial de gasolina (530 bilhões de litros, em 2004) e a expectativa é de alcançar 700 bilhões de litros em 2025 [CGEE (2005)]. O aumento exponencial da produção de etanol nos EUA (Gráfico 5) – cuja produção começou a crescer a partir de meados da década de 1990 e, principalmente, a partir de 2003 – deve-se a uma série de medidas fiscais e incentivos desde o Programa da Biomassa, de 2000, e das políticas agrícola (Title IX da Farm Bill, de 2002) e de energia (US Energy Policy Act, de 2005), implementadas pelo US Department of Agriculture (USDA) e pelo Department of Energy (DoE).

A capacidade de produção norte-americana é de cerca de 4,8 bilhões de galões/ano, mas há diversos projetos de expansão e implantação que resultarão em ampliação da capacidade instalada para 7,7 bilhões de galões/ano (29,2 bilhões de litros), um acréscimo de 60% (com alcance antecipado das metas estabelecidas para 2012). As estimativas da F. O. Licht são da produção de 4,7 bilhões de galões de etanol em 2006 e de até 8 bilhões de galões no final de 2007.¹² Hoje, entretanto, o déficit de capacidade coloca o país na posição de grande importador, inclusive do Brasil, muitas vezes partindo do Caribe com vistas a utilizar o esquema incentivado do Caribbean Basin Initiative (CBI), que isenta da tarifa adicional de US\$ 0,54/galão incidente sobre o produto brasileiro (que resulta em US\$ 140-US\$ 150 por metro cúbico adicional).

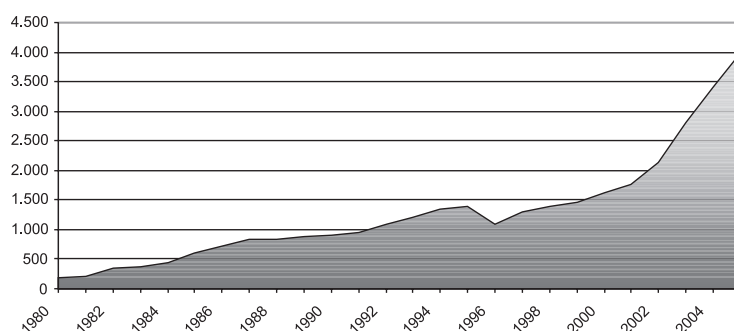
¹¹O uso ainda limitado do etanol nos EUA decorre de ser feito quase exclusivamente do amido de milho, em um processo menos eficiente e que compete com os outros usos [Technology Review (2006)], além, obviamente, da necessidade de amortização dos investimentos em petróleo.

¹²Em pronunciamento recente, o presidente americano anunciou a meta de corte de 20% no consumo de gasolina, principalmente graças ao etanol, ampliando o uso de combustíveis alternativos dos atuais 7,5 bilhões de galões anuais para 60 bilhões de galões, em 2030. Apesar desses números grandiosos, cabe mencionar que os 60 bilhões de galões de combustíveis alternativos, em 2030, substituirão não mais do que 1 bilhão de barris de gasolina (The Washington Post, 24.1.2007).

Gráfico 5

Produção de Etanol Combustível nos EUA

(Milhões de Galões)



Fonte: DoE.

Nos Estados Unidos, há diversos incentivos ao uso do etanol concedidos pelo governo federal e pelos governos estaduais. As medidas de incentivo que constam do Energy Bill 2005 são isenção de US\$ 0,51 de imposto federal por galão para combustíveis que contenham 10% de etanol (o crédito eleva-se em US\$ 0,05 por ponto percentual de etanol adicionado). Esses subsídios, previstos para vigorar até 2007, foram estendidos até 2010. Isso foi decorrente da Revisão do Energy Tax Act, em 2004, renomeado para Volumetric Ethanol Excise Tax Credit (VEETC), que estendeu a isenção fiscal a todos os níveis de mistura. Além do crédito fiscal adicional para pequenos produtores de etanol (US\$ 0,10/galão) para plantas com capacidade inferior a 30 milhões de galões/ano, outros incentivos federais incluem a dedução no imposto de renda de veículos movidos a álcool. Em 2005, como parte da nova lei de energia, introduziu-se um “padrão de combustíveis renováveis” e estabeleceu-se a meta de ampliação de cerca de 4 bilhões de galões para 7,5 bilhões de galões, em 2012. Através do “padrão de combustíveis renováveis”, condições são impostas para que o uso do etanol combustível chegue a 28,35 bilhões de litros, em 2012 [CGEE (2005)]. Por fim, cabe destacar o Bioethanol Bill, que exigirá a mistura obrigatória de etanol na gasolina (5% de etanol em todos os combustíveis, dois anos após sua aprovação, e 10% depois de outros dois anos) [CEC (2006)]. Há também medidas estaduais como o estabelecimento de metas de compras e requerimentos, padrões/normas de combustíveis, incentivos fiscais, subsídios, empréstimos e *funding* [Nexant (2006)]. Um importante incentivo é a proibição do uso de ETBE na Califórnia, desde 2004, que tem levado ao aumento no uso do etanol (o consumo atual é de 3,5 bilhões de litros).

Uma segunda fase das medidas governamentais está compreendida no Programa de Biomassa do Departamento de Energia, um desdobramento do Biomass R&D Act, de 2000, com vistas a criar nos Estados Unidos uma nova indústria – a indústria da biomassa, ou bioindústria –, consolidada com a instalação de biorrefinarias capazes de transformar vários tipos de biomassa, a preços competitivos em relação às atuais fontes fósseis, em combustíveis, produtos químicos, eletricidade e calor. As biorrefinarias e o uso da biomassa celulósica emergem como fundamentais para alcançar as metas de produção/consumo de etanol, em função das limitações das fontes atualmente empregadas. O Departamento de Agricultura (USDA) prevê que o país deverá usar 34% mais milho na produção de etanol na próxima temporada, o que representa cerca de 20% da colheita.

O programa tem como meta o aumento do papel da biomassa na economia norte-americana, de modo a responder por 10% dos combustíveis (um terço da demanda de gasolina), 5% da demanda de eletricidade e calor e 18% dos materiais e substâncias químicas produzidos, até 2020 (com 1 bilhão de toneladas de biomassa). Aparece, assim, pela primeira vez, a referência explícita

à produção de produtos químicos com base no etanol e não mais a preocupação exclusiva com biocombustíveis.

O principal desafio da utilização da biomassa é a redução dos custos do etanol (para US\$ 35/t), que é considerado o *breakeven* do petróleo. Para tal, o governo americano está apoiando projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) direcionados para a superação das barreiras técnicas em cinco áreas prioritárias: P&D cooperativa entre universidades e empresas nas áreas de abastecimento de biomassa, plataforma de açúcares, plataforma termoquímica e P&D de produtos, além do apoio à instalação de biorrefinarias integradas (pela indústria, mas com apoio do governo). No caso das refinarias integradas baseadas em resíduos agrícolas, prevê-se o início de operação da unidade de demonstração piloto em 2012 e da unidade em escala industrial em 2018. De fato, a partir de 2002, o governo selecionou e vem apoiando projetos de desenvolvimento de biorrefinarias.¹³ Em 2006, foram aprovados US\$ 160 milhões do USDA e do DoE para construção de três biorrefinarias. O apoio do governo é um componente-chave para ajudar a indústria a assumir os riscos para desenvolver aplicações em escala industrial, tanto por meio da concessão de recursos como pela participação direta da rede de cinco laboratórios públicos vinculados ao Departamento de Energia – rede esta chamada de National Bioenergy Center, com destaque para o Argonne National Laboratory e o National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Na União Européia, a indústria de etanol ainda é pequena e incipiente. Sua produção, em 2005, empregando principalmente beterraba e trigo, não chegou a 1 bilhão de litros, ainda que tenha ocorrido um incremento de 73% em relação ao ano anterior e ampliação dos países produtores, de 8 para 11. A capacidade atual de produção é de cerca de 2,1 bilhões de litros/ano e o acréscimo de capacidade será de 2,9 bilhões de litros/ano até 2008.

A Espanha é o maior produtor (303 milhões de litros, em 2005), com um terço da produção da região, seguida pela Alemanha (165 milhões de litros), Suécia (153 milhões de litros) e França (144 milhões de litros).¹⁴ Os principais consumidores, em 2005, foram esses mesmos países, além do Reino Unido. O forte aumento da produção foi superado pela demanda, para fins combustíveis, que no total alcançou 1,15 bilhão de litros, suprida por importações, principalmente por parte da Suécia e do Reino Unido.¹⁵ Cabe observar que apenas na Espanha a produção supera a demanda interna, e quase 30% do consumo europeu é importado (Gráfico 6).

Apesar dos resultados ainda modestos da produção de etanol, é importante lembrar que os mais firmes compromissos do Protocolo de Quioto foram assumidos pela União Européia e passaram a compor a Diretiva de Biocombustíveis, de 2003.¹⁶ O principal

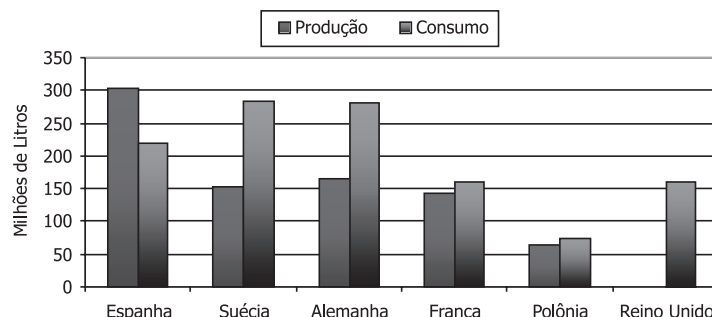
¹³Destacam-se o projeto de biorrefinaria integrada baseada no milho, da DuPont; a biorrefinaria da Cargill e outros parceiros (Iogen, Shell Global Solutions e CNH Global NV); e a biorrefinaria da Abengoa (junto com a Novozymes, a VTT Finland e o NREL, que é um dos laboratórios do Departamento de Energia do governo americano).

¹⁴A França é um país que vem apresentando grandes avanços, graças ao incentivo do governo. Em 2007, é prevista a entrada em operação de várias plantas e comecem a ser sentidos os efeitos do uso obrigatório de biocombustíveis [eBIO].

¹⁵O Reino Unido, segundo maior consumidor de etanol na Europa, não tem uma política de biocombustíveis definida pelo governo [CGEE (2005)].

¹⁶Cabe lembrar que as primeiras iniciativas de apoio às fontes renováveis na Europa remontam ao fim da década de 1990, com o White Paper on Renewable Energies, ao qual se seguiram as Diretivas da União Européia.

Gráfico 6
Produção e Consumo de Etanol na União Européia – 2005
(Países Seleccionados)



Fonte: Produção: eBIO; consumo: F. O. Licht.

compromisso é o uso obrigatório de biocombustíveis antes de 2010. A mistura de 2% de etanol na gasolina começou a ser exigida em 2005 (embora não tenha sido alcançada pelos estados membros, que, em média, registraram 1,4%). A meta de 5,75%, para 2010, exigirá expansão de capacidade para cerca de 12 bilhões de litros, ao custo estimado de pelo menos € 7 bilhões. Há perspectivas de importações expressivas de países como o Brasil (que hoje já responde por 44% das importações da região), mesmo com as pressões para imposição de sobretaxas para a importação de combustíveis como o etanol, à semelhança do que foi feito pelos Estados Unidos.

A meta da Comissão Européia é substituir 20% dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, até 2020 [Directive 2003/03/EC]. Além do uso como aditivo à gasolina, a Comissão recomenda aos países membros que adotem políticas de redução de impostos para os biocombustíveis. Cabe destacar a aprovação, em 2005, do Plano de Ação da Biomassa e, em 2006, a Estratégia de Biocombustíveis.

As Diretivas da União Européia estabelecem as bases mínimas comuns da política de biocombustíveis, mas há autonomia das políticas nacionais e diferenças importantes nos percentuais na produção de ETBE, bem como nos incentivos à produção de etanol.¹⁷ Na Suécia, por exemplo, há incentivos especiais para veículos *flex fuel*, tais como redução tarifária de 20% na compra, privilégios especiais de estacionamento e a não-incidência de *congestion charge* [CEC (2006)]. Na França, onde há mais de dez anos há incentivo para os biocombustíveis [CGEE (2005)], foram adotados programas recentes de estímulo ao etanol e políticas protecionistas aos produtores nacionais. Investimentos de € 1 bilhão para construção de seis novas unidades deverão resultar em acréscimo de

¹⁷A *Energy Taxation Directive*, de 2003, autoriza os estados membros a concederem reduções/isenções tributárias para combustíveis renováveis de até 50% da obrigação fiscal normal. A *Fuel Quality Directive*, do mesmo ano, permite a adição de biocombustíveis.

capacidade de 1,1 bilhão de litros de etanol, em 2009 [Agência Estado (2006)]. Na Alemanha, incentivos fiscais também estão sendo concedidos para investimentos de € 600 milhões na construção de três novas unidades [Inovação Unicamp (2006b)].

A estratégia da União Européia para os biocombustíveis e, em particular, para o etanol contempla sete eixos de política: 1) estímulo à *demand*a de biocombustíveis, apoiada em isenções tributárias (há também a proposta legislativa ao Parlamento Europeu para promover compras públicas de veículos limpos e eficientes); 2) captura dos *objetivos ambientais* pela redução das emissões de CO₂; 3) estímulo à *produção* e distribuição de biocombustíveis; 4) expansão da oferta de *matérias-primas* (incentivo ao cultivo de “energy crops”, de prêmio de € 45 por ha, com área máxima garantida de 1,5 milhão de ha); 5) ampliação das *oportunidades de negócios*; 6) apoio aos *países em desenvolvimento* (é prevista alteração da Sugar Reform da União Européia, de modo a apoiar o desenvolvimento da produção de etanol nesses países); e 7) apoio a *P&D* em biocombustíveis e fortalecimento da competitividade dessa indústria (7th Framework Platform 2007-2013), com prioridade para pesquisas relacionadas a biorrefinaria e plataformas tecnológicas da segunda geração de biocombustíveis (etanol lignocelulósico), lideradas pela indústria [CEC (2006)].

De fato, para lidar com as metas das Diretivas que prevêm significativo aumento do uso do etanol, as políticas da União Européia seguem a mesma linha dos Estados Unidos, privilegiando a biomassa como fonte de matéria-prima, a pesquisa de novas tecnologias para produção de etanol celulósico e a instalação de biorrefinarias.

A principal meta no campo de pesquisa inclui a redução de custos de 30%, em média, a partir de 2010. Os recém-lançados Projetos Integrados Renew¹⁸ e Nile¹⁹ são considerados ações-chave no desenvolvimento em escala piloto da segunda geração de biocombustíveis [CEC (2006)]. Liderado pelo Institut Français du Pétrole, o projeto Nile é um consórcio de 21 instituições de 11 países europeus²⁰ e constitui o primeiro projeto europeu voltado para a cadeia de produção de bioetanol, com orçamento de € 12,8 milhões (60% provenientes da Comissão Européia), entre 2005 e 2009. Objetiva avaliar e desenvolver novas tecnologias para conversão, técnica e economicamente viável, de lignocelulose em etanol. Seus principais desafios são a redução do custo da hidrólise enzimática da biomassa pela redução do custo das enzimas (via desenvolvimento de novos sistemas de enzimas para sacarificação de biomassa lignocelulósica), além da melhoria da fermentação da biomassa para aumento dos rendimentos,²¹ a validação dos sistemas de enzimas geneticamente desenvolvidos e das correntes de leveduras em planta piloto integrada.

¹⁸Renewable Biofuels for Advanced Powertrains (Renew) é um projeto da Volkswagen, com apoio da Comissão Européia de € 10 milhões.

¹⁹New Improvements for Lignocellulosic Ethanol (Nile) é um projeto coordenado pelo IFP/França, com apoio da Comissão Européia no valor de € 7,7 milhões.

²⁰Envolve a italiana Eni Technologie; a finlandesa Royal Oy; a empresa francesa SAF-ISIS, que desenvolve enzimas; a sueca SvenskE-tanol kemi, que produz etanol e derivados (ácido acético e acetato de etila); a empresa de enzimas alemã Direvo Biotech (spin-off do Max Planck Institute); a sueca Etek Etanolteknik, produtora de etanol de biomassa florestal; e a BioAlcohol Fuel Foundation (BAFF), que desenvolve técnicas de produção e uso de etanol bio-based, entre outras.

²¹A meta para redução do custo de produção do etanol da biomassa é de 15-20%, no caso da produção de eletricidade, e de 30-50%, no caso do custo dos biocombustíveis.

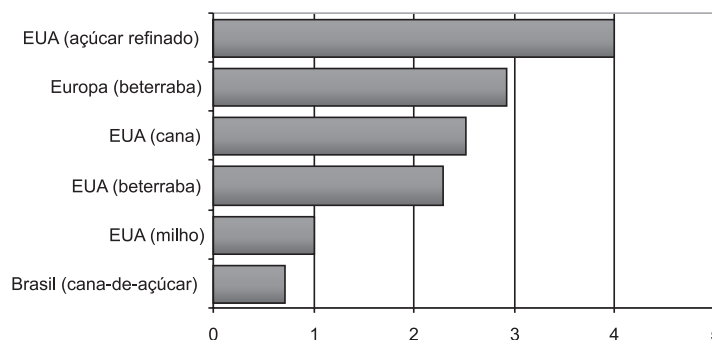
Em síntese, programas da União Européia e dos Estados Unidos dedicam cada vez maior espaço ao etanol e, em especial, à utilização da biomassa como fonte de matérias-primas, com aporte de recursos para P&D em novas tecnologias e a aposta no desenvolvimento e na construção de biorrefinarias. De fato, as perspectivas de consolidação de seus mercados de etanol e alcance das metas de expansão do uso do etanol exigem a ampliação da produção em níveis não passíveis de serem atendidos. A ampliação da produção de etanol sem aumento da área cultivada requer o uso de fontes alternativas como a biomassa, que, ademais, poderá tornar o etanol competitivo em custos. Atualmente, isso não ocorre e há diferenças marcantes de custo dependendo da matéria-prima utilizada e dos processos de produção do etanol.

Nos Estados Unidos, os custos variáveis do etanol do milho estão em US\$ 0,96/galão e os custos fixos entre US\$ 1,05 e US\$ 3,00, enquanto o Brasil tem custos variáveis de US\$ 0,89/galão e custos fixos de US\$ 0,21/galão, com custos totais de US\$ 1,10/galão [Martines-Filho *et al* (2006)]. Segundo a Unica, os custos de produção do etanol no Brasil estariam em US\$ 0,90-US\$ 1,30/galão. Os números do USDA comparam o custo de produção do etanol fabricado com base em diferentes matérias-primas (Gráfico 7). Informações de quaisquer das fontes consultadas confirmam, entretanto, a vantagem comparativa de custos do etanol brasileiro. Segundo especialistas, mesmo com a hipótese improvável de o preço do petróleo retornar a seus patamares históricos (US\$ 30-35/barril), o etanol brasileiro não perderia sua competitividade.

Gráfico 7

Custo de Produção do Etanol

(US\$/Galão)



Fonte: USDA.

O etanol (C_2H_5OH), um grupo de compostos químicos cujas moléculas contêm o grupo OH ligado a um átomo de carbono, sendo obtido por fermentação ou de síntese, é produzido com base na cana-de-açúcar, na beterraba, no amido de cereais como o milho e outros grãos, por meio de processos de produção conhecidos,²² envolvendo tecnologias relativamente simples.²³

No caso brasileiro, as vantagens da produção de etanol são decorrentes de importantes avanços tecnológicos pelos quais passou a cultura da cana ao longo de sua história recente, que envolveram melhoramento genético, mecanização agrícola, gerenciamento, controle biológico de pragas, reciclagem de efluentes e práticas agrícolas. Nesse processo, foi fundamental o arranjo institucional estruturado para pesquisas em cana-de-açúcar, que permitiu suprir variedades mais produtivas e resistentes, desenvolvidas graças a programas de melhoramento genético do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC),²⁴ da Rede Interuniversitária de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (Ridesa), do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e da parceria da Canavialis/Votorantim e Allelys. A contribuição do CTC e do Consórcio Internacional de Biotecnologia da Cana-de-Açúcar (ICBS) e os resultados do Projeto Genoma, na área de biologia molecular, com a identificação dos genes relacionados à resistência a doenças, metabolismo de carboidratos e nutrientes, resposta a estresse etc., possibilitarão o desenvolvimento de variedades transgênicas e redução de custos, previstos para chegar ao mercado em cinco anos [CGEE (2005)].

Os avanços na mecanização foram lentos na área do plantio, mas importantes no segmento de colheita, em decorrência da extinção das queimadas nos canaviais imposta pela legislação ambiental, que possibilitou a redução de custos e ganhos de qualidade [CGEE (2005)].²⁵

O processo de produção do etanol da cana propriamente dito compreende as seções de recepção, preparo e moagem, tratamento do caldo, fabricação do açúcar e destilaria de álcool, além das utilidades, disposição de efluentes e estocagem de produtos. O etanol é produzido por processo de fermentação em batelada alimentada com reciclo de fermento (uma pequena parcela é produzida por fermentação contínua multiestágio com reciclo de fermento). Na área de recepção, embora não empregada por muitas usinas brasileiras, há tecnologias disponíveis embutidas em equipamentos, capazes de reduzir os teores de impurezas contidos na cana recebida que causariam problemas de processamento, de qualidade dos produtos e de custos de manutenção. A tecnologia da fase de preparo também está disponível. A extração do caldo, por seu turno, utiliza processo de moagem que passou por desenvolvimentos tecnológicos que garantem expressivos ganhos de eficiência.

As Tecnologias do Etanol e o Desafio das Biorrefinarias

²²O emprego de microrganismos para converter substâncias em bebidas data de culturas primitivas e, embora o emprego de processos vitais de fermentação para produção de substâncias químicas seja mais recente, o processo de produção é praticamente o mesmo. Desde 1920, os processos vitais de microrganismos são aplicados para a fabricação de substâncias derivadas do etanol.

²³A produção de etanol no mundo usa, atualmente, principalmente o açúcar, com 61% do total, enquanto o amido fica com os 39% restantes [F. O. Licht, USDA]. Em termos mais rigorosos, as matérias-primas do álcool podem ser hidrocarbonetos gasosos, materiais amiláceos, frutos, materiais sacarificados e materiais celulósicos.

²⁴Antigo Centro de Tecnologia da Copersucar.

²⁵Essa legislação tem sido importante para a redução progressiva das queimadas, um dos efeitos ambientais perversos da cana. A Lei 10.547/2000 deu passos importantes nesse sentido, mas seus efeitos são contravertidos por implicar desemprego imediato de mais de 100 mil trabalhadores rurais sazonais e, ainda, a possibilidade de induzir deslocamento da produção com vistas a escapar da legislação [Martines-Filho et al (2006)].

Na fase de tratamento do caldo, está em desenvolvimento nova tecnologia capaz de gerar um produto (mosto) livre de outras substâncias, que permite fermentação alcoólica estável, com alto rendimento e produtividade. Por fim, as tecnologias dos processos convencionais de fermentação alcoólica com reciclo de fermento (contínua em múltiplos estágios ou em batelada alimentada) estão consolidadas, ainda que apresentem potencial de aperfeiçoamento para melhoria de *performance*, ganhos de rendimento, produtividade, maior estabilidade operacional e menor consumo energético [CGEE (2005)].

Esses avanços tecnológicos correspondem, entretanto, a simples mudanças incrementais que, embora não revolucionem radicalmente os processos de produção, possibilitam melhorias operacionais e ganhos de eficiência, pela introdução de novos equipamentos. Mudanças mais radicais na tecnologia de produção do etanol estariam ligadas aos processos que possibilitarão a utilização de novas matérias-primas, como a biomassa lignocelulósica.

Enquanto a conversão dos carboidratos, açúcar e amido em etanol é relativamente simples, a conversão da biomassa é muito mais complexa e requer pré-tratamento. De fato, esses processos, que têm suas raízes na antiga química da madeira, em especial na Alemanha em tempos de guerra e ainda hoje empregados na Rússia, são conhecidos há mais de 80 anos, mediante sacarificação, ou hidrólise, da madeira, e por hidrólise ácida com ácido sulfúrico ou clorídrico como agente hidrolizante. Tais processos demandam modificações para se tornarem economicamente viáveis e competitivos em preços com os derivados do petróleo.

As principais novidades tecnológicas não estão, assim, localizadas na alcoolquímica, mas na química do etanol. As inovações mais radicais na produção de etanol com base nos materiais lignocelulósicos envolvem modificações genéticas de microrganismos que produzem enzimas que digerem a celulose e a hemicelulose encontradas na parede celular da planta, bem como variedades transgênicas de plantas mais produtivas [DoE (2006)]. Quando chegarem ao mercado, serão capazes de revolucionar os processos produtivos existentes ao usarem matérias-primas com disponibilidade quase ilimitada e quase sem valor, definindo um eventual novo paradigma tecnológico e a abertura de um leque de trajetórias tecnológicas para produção de energia, combustíveis e produtos químicos.

De fato, é a necessidade de ampliação da oferta de matérias-primas para produção de etanol, sem pressionar a área plantada para produção de alimentos, que tem levado empresas e países a investirem em pesquisas para maior utilização de resíduos lignocelulósicos. Os materiais lignocelulósicos são os compostos orgânicos mais abundantes na biosfera e participam com aproximadamente 50% da biomassa terrestre. São os resíduos agrícolas, agroindus-

triais e florestais, além de materiais desperdiçados, denominados biomassas residuais, entre os quais o bagaço e a palha de cana, o sabugo e a palha de milho, as palhas de trigo e arroz, os restos de madeira processada e os resíduos municipais baseados em papel.

Diferentemente do etanol convencional, o bioetanol é feito com base em materiais da biomassa celulósica ou, mais rigorosamente, lignocelulósica. Os esquemas de produção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica são referidos como uma segunda geração de biocombustíveis, cujo processamento é uma das mais promissoras tecnologias em fase de desenvolvimento.²⁶

Essas novas tecnologias de processamento do etanol são fundamentais principalmente nos países desenvolvidos, em que as matérias-primas hoje utilizadas competem com a produção de alimentos e os custos de produção são ainda altos em comparação com o petróleo ou o etanol da cana. Sua importância decorre, também, do fato de o etanol celulósico ter potencial de extrair pelo menos duas vezes mais combustível da mesma área de terra e da disponibilidade da biomassa, uma matéria-prima praticamente sem valor [Technology Review (2006)]. A produção de etanol lignocelulósico emerge, assim, como um novo paradigma mundial.

Esse material celulósico é composto por polissacarídeos, que são a celulose (um polímero da glicose que corresponde, em média, a 44% da biomassa lignocelulósica), a hemicelulose (um heteropolímero mais complexo, que representa 30% da biomassa lignocelulósica e é formado por pentoses, que são açúcares de cinco carbonos) e a lignina (que é o material estrutural da planta, que hoje não pode ser convertida em etanol por limitações quase intransponíveis, mas pode, ainda que de tratamento mais complexo, ser fonte de outras matérias-primas).²⁷ Os dois primeiros podem ser transformados em açúcares que, fermentados, permitirão expressiva produção adicional de etanol.

A fabricação do etanol com base nessas fontes é possível, mas exigirá o domínio de processos e tecnologias ainda não completamente dominados e desenvolvidos no mundo, no nível comercial. A conversão da celulose e da hemicelulose em etanol é possível, mas os processos são caros e complexos. Essas tecnologias correspondem aos processos de hidrólise ácida (processo químico) ou enzimática (processo biotecnológico), para chegar aos açúcares e, depois, por fermentação, produzir o etanol propriamente dito²⁸ (Gráfico 8).

O processo de hidrólise destina-se a quebrar as (macro) moléculas de celulose ou hemicelulose, por meio da adição de ácido sulfúrico aos resíduos, no caso da hidrólise ácida, ou pela ação de

As Novas Tecnologias do Etanol Lignocelulósico

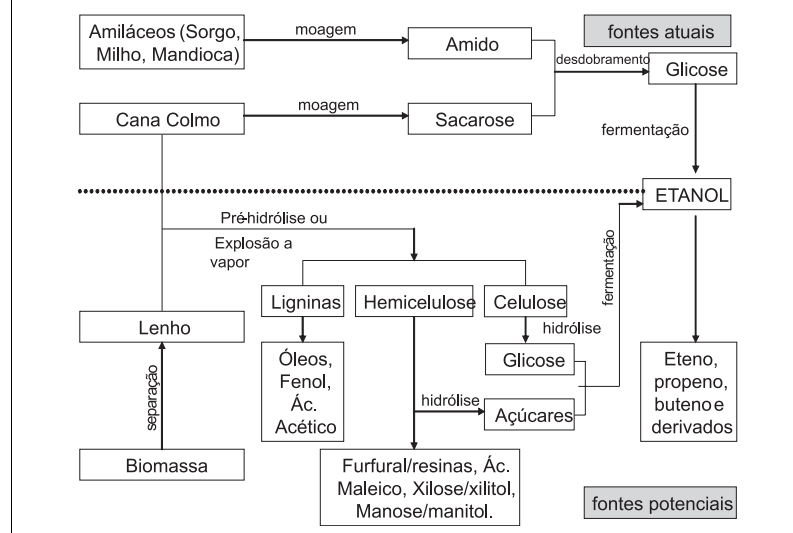
²⁶Outras tecnologias para converter biomassa em combustíveis líquidos incluem o biodiesel Fischer-Tropsch e o bio-DME (dime-til éter), que já contam com plantas de demonstração em operação na Alemanha e na Suécia [CEC (2006)].

²⁷A estrutura lignocelulósica refere-se à parte do vegetal que forma sua parede celular, composta por estruturas fibrosas, constituídas basicamente por polissacarídeos (40% a 60% de celulose e 20% a 40% de hemicelulose), associados a uma estrutura macromolecular contendo substâncias aromáticas, a lignina (15% a 25%). Esses materiais, em geral, possuem em sua composição cerca de 65% a 75% de polissacarídeos (em base seca), que contêm em suas unidades monoméricas valiosos glicídios (açúcares). A estrutura hemicelulósica, diferentemente da celulose, não apresenta cristalinidade, sendo, portanto, mais suscetível à hidrólise química sob condições mais brandas [Pereira Jr. (2006)].

²⁸Outro processo menos enfatizado na literatura é o que compreende a execução sucessiva das fases de gaseificação, fermentação e destilação.

Gráfico 8

Fontes de Etanol



enzimas (catalisadores orgânicos), no caso da hidrólise enzimática. Essa última reproduz o processo existente na natureza, em que a quebra das longas cadeias das moléculas de celulose em açúcares é feita por enzimas (chamadas celulasas, secretadas por fungos ou bactérias, microrganismos que se alimentam de matéria orgânica, alterando-a e formando substâncias químicas) e a fermentação, por leveduras, dos açúcares em etanol. O processo de hidrólise enzimática requer o desenvolvimento de microrganismos capazes de quebrar a celulose, fermentar o açúcar, tolerar altas concentrações de etanol²⁹ e produzir exclusivamente o etanol (sem subprodutos indesejáveis). Os esforços de criação de tal microrganismo concentram-se em modificar geneticamente um determinado microrganismo existente, com a remoção de características genéticas indesejadas e o acréscimo de genes (de outro microrganismo), incorporando características que permitam redução do número de etapas do processo de conversão, redução de custos e aumento da competitividade do produto. Existem esforços também no sentido de desenvolver um microrganismo sintético pela construção quase integral de um genoma [Inovação Unicamp (2006c), Technology Review (2006)]. Diversos resultados já foram alcançados por grupos de pesquisas no exterior, que esbarram ainda no obstáculo do custo ainda elevado das enzimas.³⁰

²⁹No processo de fermentação atualmente em uso, o etanol tem de ser retirado dos tanques de fermentação para evitar a morte das leveduras [Inovação Unicamp (2006c)].

³⁰Há também dificuldades para redução de custos do etanol na fermentação de açúcares de cinco carbonos (pentoses), que é uma porcentagem significativa da biomassa.

Em nível comercial, os principais resultados no desenvolvimento da tecnologia de hidrólise enzimática foram alcançados pela logen, empresa canadense de biotecnologia com faturamento anual de US\$ 15 milhões, mas que tem ampliado recursos para pesquisas em virtude do estabelecimento de parcerias com empresas como a Shell Global Solutions (braço tecnológico da gigante do petróleo) e a PetroCanada, além de recursos do governo canadense.

se, já tendo resultado em patentes depositadas. O processo compreende tratamento prévio do material lignocelulósico através de explosão com vapor, o desenvolvimento de uma enzima (linhagem mais produtiva da celulase) com base na modificação genética de um fungo tropical (o *Trichoderma reesei*), com vistas a hiperproduzir suas enzimas que digerem a celulose,³¹ instalação de unidade piloto de demonstração do processo e o início da venda de pequenas quantidades do produto, em 2004.

A planta de demonstração consome apenas 30 toneladas de biomassa e tem capacidade de produção de 1 milhão de galões/ano. Uma planta economicamente viável deveria consumir 1.500 toneladas de biomassa/dia e ter capacidade de produção em torno de 45 milhões de galões/ano. Os investimentos na primeira planta comercial, programada para operar em 2007, deverão somar US\$ 300 milhões, que representa cinco vezes o investimento em uma planta de etanol do milho, com mesmo porte [Technology Review (2006), CNNMoney.com (2006) e Inovação Unicamp (2006c)].

Há várias outras iniciativas na área, como a parceria Shell/VW para viabilizar a produção de etanol celulósico na Alemanha e o início da construção da planta de demonstração de etanol de biomassa da Abengoa Bioenergy Corporation, com capacidade de 5 milhões litros/ano.

Para ilustrar as limitações no estágio atual da tecnologia de produção do etanol celulósico, alguns indicadores são confrontados na Tabela 1, seja ele fabricado a partir do milho ou da celulose, nos Estados Unidos.

Segundo especialistas, há vantagens e desvantagens em cada uma das duas rotas tecnológicas de hidrólise. O processo

³¹Cabe ressaltar que o incentivo do governo americano à produção de etanol tem beneficiado enormemente as empresas produtoras de enzimas. As perspectivas são promissoras para empresas como a Genencor International (GCI), subsidiária da Danisco, a Novozymes Biotech Inc (NB), a Diversa Corp (cujas enzimas serão usadas na biorrefinaria da DuPont/Universidade de Michigan, NREL, Deere & Co, com operação prevista para 2007), e a BCI [Chemical & Engineering News (20.2.2006)].

Tabela 1

Quadro Comparativo das Características Atuais da Produção do Etanol Celulósico e do Milho nos EUA

	MILHO	MATERIAIS CELULÓSICOS
Custo de Capital para Construção de Plantas (US\$/Galão)	\$1,25-\$1,50	\$4,30-\$5,40
Custo das Enzimas (US\$/Galão)	\$ 0,03	\$0,30-\$0,50
Custo de Produção do Etanol (US\$/Galão)	\$1,10	\$2,30
Custo de Transporte das Matérias-Primas	baixo	alto
Rendimento do Etanol por Tonelada Seca de Biomassa (Galões)	98	70-80
Tempo de Fermentação (Em Dias)	2	7
Processo de Conversão	simples	complexo
Utilização de Trabalho nas Plantas de Processamento	baixo	alto
Energia Utilizada no Processo	gas natural e eletricidade	auto-suficiente

Fonte: USDA (2006).

químico, de hidrólise ácida, tem a vantagem de envolver uma tecnologia mais conhecida, mas apresenta a desvantagem de (por usar um ácido como “catalisador”) ser muito rápida e envolver dificuldades de controle de modo a evitar reações paralelas indesejáveis. Na hidrólise enzimática, um processo que contempla subsídios da biotecnologia moderna, a quebra da molécula de celulose/hemicelulose é feita por enzimas; ou seja, por uma molécula biológica, que promove reações “em meio específico, com a máxima eficiência, mas de forma mais lenta e mais propensa a bloqueios e inibições” [Inovação Unicamp (2006)]. Essa última envolve maior complexidade por requerer conhecimentos de áreas pertinentes à biotecnologia moderna, engenharia genética e pesquisa biológica fundamental, construídas sobre os avanços da chamada revolução da biologia molecular, para o desenvolvimento da enzima. Mas essas novas técnicas abrem perspectivas e potencialidades para a química do etanol, da mesma forma como vêm revolucionando indústrias como a farmacêutica.

Embora nenhuma iniciativa tenha ainda alcançado estágio de viabilidade comercial – as barreiras são os elevados custos do complexo enzimático, a baixa taxa de conversão da celulose em açúcares, a necessidade de pré-tratamento para conseguir conversões eficientes –, a tecnologia de hidrólise enzimática apresenta grande potencial em virtude de características como a especificidade da reação, ausência de reações secundárias (que levariam à perda de rendimento), ausência da formação de produtos secundários (inibidores da fermentação alcoólica) e reação em condições suaves que não requerem altas pressões e temperaturas ou ambientes corrosivos para os equipamentos [CGEE (2005)].

Pereira Jr. (2006) observa que a decisão de usar um ou outro processo de hidrólise depende também do tipo de material lignocelulósico empregado. Na hidrólise da hemicelulose (que ocorre em condições mais brandas do que no caso da celulose), a estratégia tem sido a utilização de ácido sulfúrico diluído. No caso da celulose, como a hidrólise química requer condições de alta severidade (elevadas temperaturas, grandes tempos de exposição e altas concentrações de ácido), pela maior resistência ao ataque hidrolítico, o uso da hidrólise enzimática seria mais indicado (pela ausência de condições severas). Segundo o autor, tal estratégia tecnológica difere da concepção de processos antigos em que se buscava a hidrólise química conjunta da celulose e da hemicelulose, pois são polissacarídeos com diferentes suscetibilidades ao ataque hidrolítico.

As apostas norte-americana e européia no etanol lignocelulósico têm recaído no desenvolvimento dos processos de hidrólise enzimática, enquanto no Brasil o interesse das empresas parece mais voltado para a hidrólise ácida – ainda que muita pesquisa acadêmica seja realizada nas duas áreas. No Brasil, duas iniciativas

são freqüentemente mencionadas: o projeto Dedini Hidrólise Rápida (DHR) e, mais recentemente, a iniciativa da Oxiten S.A. [Inovação Unicamp (2006)].

A primeira iniciativa brasileira envolve um tradicional fabricante de equipamentos para o setor sucroalcooleiro que em parceria com o CTC, a Fapesp e um produtor de açúcar e álcool, que ao longo de 15 anos desenvolveu tecnologia de hidrólise, com patentes depositadas e instalação de uma unidade de demonstração da tecnologia (em operação desde 2004, com capacidade de 5 mil litros/dia, a partir de 50 t/dia de biomassa lignocelulósica da cana). Para alcançar o rendimento e a rentabilidade adequados, a unidade industrial deverá ter capacidade dez vezes maior e requer aperfeiçoamentos na otimização energética e no desenvolvimento de equipamentos, periféricos, automação e sistemas de segurança, a serem desenvolvidos nos próximos dois anos, a fim de possibilitar o desenvolvimento de um “pacote” de tecnologia/equipamento a ser entregue na mão do cliente [Inovação Unicamp (2006) e CGEE (2005)].³² A segunda iniciativa, mais recente, envolve uma empresa petroquímica que está buscando parcerias para não apenas desenvolver plenamente a tecnologia de hidrólise ácida (da biomassa proveniente do bagaço e palha da cana), mas a implantação efetiva de uma biorrefinaria e o desenvolvimento de processo de hidrogenólise para substituição de fonte de matéria-prima de produto da nafta pelo etanol.

A Tabela 2 resume as principais características dos processos de hidrólise ácida e enzimática. Os dois processos são

³²A tecnologia é baseada no tratamento específico do bagaço (pré-tratamento organosolv com solução hidroalcoólica que promove o afrouxamento do material lignocelulósico, dissolvendo a lignina, desestruturando a celulose e permitindo ataque ácido rápido) e utiliza hexoses que são a fração de mais fácil fermentação [Inovação Unicamp (2006) e CGEE (2005)]. O principal problema desse processo parece associado à alimentação do bagaço ao reator de hidrólise, cujo sistema foi reformulado em 2005 e iniciada a operação contínua da unidade, embora ainda sejam necessários ajustes.

Tabela 2

Hidrólise Ácida e Enzimática de Biomassa Lignocelulósica para Produção de Etanol

HIDRÓLISE ÁCIDA	HIDRÓLISE ENZIMÁTICA
<ul style="list-style-type: none"> • Quebra da celulose/hemicelulose por adição de ácido (sulfúrico) O ácido precisa ser muito controlado para evitar reações paralelas indesejáveis • Tecnologia mais simples (base científica conhecida) • Prazo mais curto para desenvolvimento da tecnologia • Em tese, menores riscos, mas menor retorno • Desafio em termos de inovação está centrado no desenvolvimento de equipamentos (com base em materiais mais resistentes à corrosão) • Foco de empresas brasileiras (Dedini e Oxiten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Quebra da celulose/hemicelulose por enzimas Necessidade de manipulação genética de microrganismos para produção de enzimas capazes de reduzir etapas e, conseqüentemente, custos do processo. • Tecnologia mais complexa (bases científicas da biotecnologia moderna, menos conhecidas) • Prazo mais longo para desenvolvimento da tecnologia • Possivelmente, maiores riscos, mas também maior retorno • Desafio centrado no desenvolvimento de enzimas a custo competitivo • Foco de empresas e programas de governo dos Estados Unidos e da União Européia (Programa de Biomassa do US DoE e projetos prioritários do Programa de Biomassa da União Européia)

Fonte: *Elaboração própria.*

atualmente conhecidos, mas apresentam rendimentos ainda ruins, investimentos elevados e ainda sem viabilidade econômica.

Especialistas brasileiros acreditam na possibilidade de um modelo diferente para o Brasil, em relação a outros países, justificado pelo fato de a matéria-prima (proveniente do resíduo da cana, o bagaço) estar quase pronta para entrar em hidrólise (foi passada por faca de corte e desfibradores, quando da moagem da cana, que já reduziram o tamanho das moléculas). O setor sucroalcooleiro gera aproximadamente 16 milhões de toneladas de bagaço de cana excedente e 76 milhões de toneladas de palha, cuja utilização permitiria decuplicar a produção brasileira de etanol [CGEE (2005)]. O desperdício de material celulósico corresponde a dois terços da área plantada da cana (o bagaço e a palha são hoje usados na geração de energia, queimados ou deixados no campo) e, atualmente, apenas um terço da biomassa contida na planta é aproveitada para produção de etanol ou açúcar [Inovação Unicamp (2006d)]. Consideram, ademais, que o diferencial brasileiro estaria na integração existente dentro da própria usina – integração da produção, facilitando emissão de efluentes, energia e processos, e logística para distribuição interna e externa, como estocagem, transporte e escoamento [Inovação Unicamp (2006)].

Isso permite atender ao requisito de substancial balanço energético positivo, o que não ocorre hoje, por exemplo, com o milho, que não é auto-energético e exige o uso de combustível fóssil na produção de etanol. No etanol da cana, o resíduo da produção é transformado em energia empregada na própria produção, dispensando energia fóssil [Inovação Unicamp (2006)]. Com efeito, essa vantagem específica da cana em termos energéticos frente a outras fontes de matérias-primas para o etanol deve contribuir para a definição de um modelo específico para o Brasil.

Por fim, conforme analisado em CGEE (2005) e Pereira Jr. (2006), além dos processos de hidrólise comentados, as pesquisas em etanol têm sido orientadas, também, para uma terceira tecnologia, o processo de sacarificação e fermentação alcoólica simultâneas (SSF), que combina em uma só etapa a hidrólise enzimática e a fermentação alcoólica dos açúcares. O foco principal é o desenvolvimento de leveduras termotolerantes, com base no melhoramento genético de linhagens de *Saccharomyces* e *Kluyveromyces* e por meio do emprego da celulase do *Trichoderma reesei*. Os resultados alcançados são ainda modestos, com rendimentos e produtividade baixos, em especial por exigir pré-tratamento do material lignocelulósico, não apresentando perspectivas concretas no curto prazo.

O Desafio das Biorrefinarias

Em teoria, quaisquer instalações que utilizem biomassa e produzam mais de um produto podem ser consideradas biorrefinarias. O conceito distingue-se, portanto, de uma simples planta que produz um único produto com base em uma matéria-prima renovável. Na realidade, a definição de biorrefinaria apareceu pela primeira vez na legislação americana recentemente, na Farm Bill, de 2002, com o significado de instalações, equipamentos e processos que convertem a biomassa em biocombustíveis e produtos químicos e ainda podem gerar eletricidade. No Programa Plurianual de Biomassa [DoE (2005)], o termo foi expandido, de modo a contemplar instalações que usem especificamente a biomassa lignocelulósica para fazer um conjunto de combustíveis e produtos químicos em uma combinação *ótima*, de modo a maximizar o valor da biomassa e, assim, o retorno financeiro do investimento.

O conceito é análogo ao das refinarias de petróleo, que fabricam múltiplos produtos, como combustíveis (em grande volume) e também, com vistas a ampliar a lucratividade, uma parcela de produtos químicos de alto valor unitário. As biorrefinarias – refinarias baseadas no etanol lignocelulósico em modelo semelhante ao das refinarias de petróleo – integram nas mesmas instalações equipamentos e processos de conversão de biomassa, com vistas a produzir combustíveis, energia e produtos químicos. Tal qual uma refinaria de petróleo, deve ser capaz de produzir múltiplos produtos e, com isso, tirar vantagem das diferenças nos componentes e intermediários da biomassa, maximizando valor, ao produzir produtos químicos em pequenos volumes, mas alto valor unitário, além de grandes volumes de combustíveis líquidos de baixo valor, e ao mesmo tempo gerar eletricidade [NREL (2006)].

Em síntese, biorrefinaria é um termo relativamente novo que se refere ao uso de matérias-primas renováveis e de seus resíduos, de maneira integral e diversificada, para a produção, por rota química ou biotecnológica, de uma variedade de substâncias e energia, com a mínima geração de resíduos e emissões de gases poluidores. O conceito faz sentido se for empregada uma matéria-prima abundante, barata e específica, como a biomassa lignocelulósica – ao contrário das distintas fontes atualmente empregadas para produção de etanol e que competem com outros usos –, como o petróleo foi um dia. O apoio do governo à indústria visa desenvolver biorrefinarias capazes de competir economicamente com as refinarias de petróleo.

De acordo com Kamm *et al* (2005), as tecnologias atuais das biorrefinarias são baseadas na utilização de toda a planta, ou complexo da biomassa, e na integração de processos tradicionais e modernos de utilização de matérias-primas biológicas. Especialistas acreditam que as biorrefinarias possam vir a constituir uma indústria-chave do século XXI, responsável até mesmo por uma nova

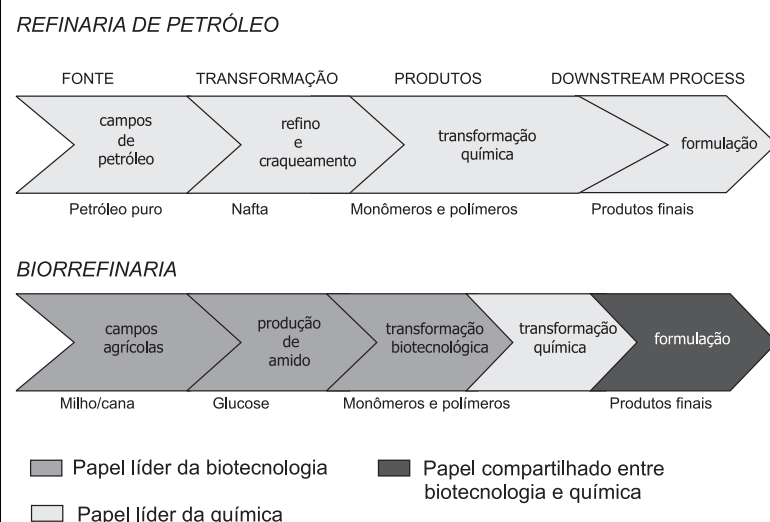
revolução industrial, em virtude da importância das tecnologias que empregam e dos efeitos sobre o paradigma industrial.

Conforme a declaração de um membro do *board* da Degussa AG à Chemical Engineering (2006), a conversão desses materiais renováveis (em substituição aos recursos fósseis) é um dos maiores desafios para os próximos cinquenta anos, cujos líderes serão firmas e economias que conseguirem desenvolver tecnologias que viabilizem uma alternativa à economia baseada no petróleo. As atuais refinarias integradas de petróleo foram também resultado de uma longa evolução que exigiu mais de cinquenta anos.

O Gráfico 9 correlaciona o conceito de biorrefinaria ao de uma refinaria convencional de petróleo, de modo a possibilitar a analogia dos dois conceitos.

No Brasil, a Oxitenio S.A. Indústria e Comércio, empresa petroquímica pertencente ao Grupo Ultra que tem como principal negócio a produção de derivados de óxido de eteno e solventes oxigenados, é a primeira empresa brasileira do setor químico a explicitar a definição de um projeto de implantação de uma biorrefinaria para obter produtos hoje derivados do petróleo com base no bagaço e na palha da cana-de-açúcar (ou seja, celulose e hemicelulose).³³ De acordo com Inovação Unicamp (2006d), o projeto, iniciado há mais de dois anos, compreendeu o levantamento do estado da arte e visitas a projetos em fase de laboratório ou de plantas de demonstração, pilotos e protótipos nos Estados Unidos, Canadá e Suécia.

Gráfico 9
Esquema Comparativo – Refinaria de Petróleo e Biorrefinaria



³³O eteno, principal fonte de produtos petroquímicos, é hoje um produto escasso e a produção das centrais existentes não deverá ter aumentos substanciais de capacidade até a entrada em operação da refinaria petroquímica de Itaboraí, que deverá ocorrer a partir de 2012 com a geração de 1,3 milhão de t/ano de eteno.

Fonte: Roquette (2006).

Objetiva a construção e o início de operação de uma planta em escala industrial, com base no processo de hidrólise ácida objeto de depósito de patente. O projeto conceitual da unidade industrial já foi elaborado, por uma empresa sueca, e acompanhado de *scale-down* para uma unidade de demonstração a ser instalada, envolvendo também pesquisas cooperativas com instituições acadêmicas, apoiadas pela Fapesp.³⁴

A biorrefinaria contemplará a produção de etanol (com base na celulose e hemicelulose contidas no bagaço, nas pontas e na palha da cana), empregando processo de hidrólise ácida (possivelmente complementada pela fabricação convencional do etanol com base em açúcares, ou sacarose), bem como produtos derivados de segunda geração da álcoolquímica (ou petroquímica), como o etilenoglicol e o propilenoglicol, empregando a hidrogenólise. A hidrogenólise corresponde à quebra de moléculas de açúcar por meio da reação com o hidrogênio, fundamental para a produção de glicóis. Essa segunda tecnologia teria sido desenvolvida pela empresa por meio de projetos cooperativos com entidades do exterior (inclusive uma empresa inglesa que será co-proprietária da tecnologia).

Vale destacar que o projeto da biorrefinaria corresponde a uma diversificação estratégica da fonte de matérias-primas empregadas pela empresa, que quando implantada representará a substituição da petroquímica pela álcoolquímica, em função das limitações de ampliação de capacidade pela indisponibilidade de derivados de primeira geração da nafta petroquímica no país. Caso a empresa consiga realizar o aproveitamento integral da biomassa, com base na cana, o custo de produção do etanol poderá cair a níveis capazes de induzir a queda de seu preço de mercado e seu uso para produção de eteno.

Por razões econômicas, ambientais e geopolíticas, o mundo está cada vez mais voltado para fontes renováveis de matérias-primas, particularmente o etanol, seja através do estímulo à produção e ao uso de biocombustíveis, seja pelo estímulo ao seu uso na fabricação de produtos químicos pela rota álcoolquímica. O retorno aos aumentos do preço do petróleo, as perspectivas de esgotamento de fontes fósseis, os riscos geopolíticos da dependência do petróleo, cujas reservas conhecidas estão predominantemente localizadas em regiões politicamente “instáveis”, e compromissos mais sólidos com as questões ambientais têm levado as fontes renováveis a constar de forma definitiva das agendas e políticas públicas de praticamente todos os países, em especial os desenvolvidos. Os Estados Unidos, por exemplo, maior consumidor mundial de petróleo (um quarto do total), mantém apenas 3% das reservas conhecidas e importam 60% do que consomem – no Brasil, quando do lançamento do Proálcool, 90% do petróleo consumido era impor-

Considerações Finais

³⁴Para maiores detalhes dessas informações sobre a iniciativa da Oxígeno e sua estratégia na rota etanol/álcoolquímica, ver a entrevista do presidente da empresa ao jornal eletrônico Inovação Unicamp (2006d).

tado. Os gastos com petróleo representam 35% das importações totais americanas e deverão alcançar 70% nos próximos vinte anos.

Estimulada por políticas ativas, a produção de etanol tem apresentado forte crescimento nesta década em particular nos Estados Unidos, que em 2005 conseguiu abalar pela primeira vez a posição hegemônica brasileira. O mundo produz, hoje, mais de 40 bilhões de litros de etanol por ano, dos quais 70% cabem ao Brasil e Estados Unidos. Os principais instrumentos utilizados pelos governos para fomentar a indústria do etanol englobam tanto mecanismos de estímulo à produção quanto ao consumo, com o estabelecimento de metas para adição de biocombustíveis ou como aditivos aos combustíveis convencionais, créditos ou incentivos fiscais à produção de biocombustíveis e ao cultivo de matéria-prima, postergação do pagamento de impostos, empréstimos e garantias para construção de unidades ou para desenvolvimento de novas fontes de matérias-primas.

Na presente década, as atenções não mais se restringem ao etanol combustível, mas incorporam o etanol grau químico, fonte de matérias-primas químicas utilizadas pela indústria de transformação. Isso significa uma redescoberta da alcoolquímica, segmento da indústria química que utiliza o etanol (ou álcool) como matéria-prima para a fabricação de produtos químicos e que perdera espaço no cenário mundial quando da consolidação da indústria petroquímica.

Nesse novo panorama de consolidação do etanol, emergem como aspectos centrais das ações de empresas e de políticas públicas o desenvolvimento de tecnologias de produção com base na biomassa lignocelulósica e o conceito de biorrefinarias integradas, baseadas no etanol, capazes de produzir combustíveis, produtos químicos e energia. Embora ainda existam barreiras de natureza técnica e econômica para o desenvolvimento em nível comercial das tecnologias necessárias para a implantação de biorrefinarias, a ênfase dos governos parece indicar um caminho sem volta.

Nos últimos trinta anos, o Brasil atuou praticamente sozinho no desenvolvimento de um mercado estável de etanol e apenas nesta década surgem novos mercados e novos atores, às custas de forte intervenção, incentivos e subsídios. O etanol de cana-de-açúcar apresenta expressivas vantagens comparativas de custo de produção, sendo de 30% a 50% inferior ao custo do etanol do milho (norte-americano) e três quartos do etanol de beterraba (europeu). E os custos de produção atuais dos processos que empregam a biomassa lignocelulósica ainda são proibitivamente elevados. No entanto, a intensa mobilização de empresas, da academia e o enorme apoio público nos países desenvolvidos, com concessão de diversos incentivos, prometem resultados auspiciosos num horizonte não muito distante e a instalação de biorrefinarias já é uma realidade no cenário futuro do mercado de energia e produtos químicos.

Os custos adicionais dos crescentes subsídios seriam compensados pelos enormes benefícios políticos e sociais vislumbrados. Todos os esforços do mundo desenvolvido estão voltados para a redução dos custos de produção do etanol lignocelulósico, com metas e prazos estabelecidos e resultados previstos já para os próximos 15 anos.

No Brasil, a despeito da consagração do etanol (combustível), o cenário internacional abre espaço para uma nova rodada de políticas públicas, no sentido do desenvolvimento tecnológico com vistas à consolidação dos resultados e vantagens comparativas de custos alcançadas nas últimas décadas, além do natural balanço energético positivo do etanol da cana. É fundamental ampliar o escopo do etanol no sentido de uma redescoberta da indústria alcoolquímica que ofereça uma alternativa concreta de matérias-primas para atender o crescimento almejado da economia brasileira, sem pressões adicionais sobre o já expressivo déficit da balança comercial da indústria química (estimado em US\$ 8,6 bilhões, em 2006). Mesmo com a auto-suficiência, nosso petróleo em águas profundas é composto principalmente por frações pesadas, o que impõe limitações para o aumento da oferta doméstica de nafta petroquímica (hoje, 30% a 40% importada). A alcoolquímica surge como uma alternativa, ao lado de outras iniciativas que visam à maior utilização das frações pesadas, para a fabricação de produtos químicos. No curto prazo, essas iniciativas são importantes, mas no médio e longo prazos será necessário recorrer a alternativas mais duradouras. A utilização do etanol em complemento ao eteno petroquímico abrirá grandes perspectivas de crescimento da produção química brasileira.

Para isso, parecem necessárias medidas específicas de apoio ao etanol químico, contemplando tanto o estímulo ao consumo quanto à sua produção, com incentivos fiscais, creditícios e de preços para unidades industriais que empreguem o etanol como matéria-prima. Em particular, deverão ser apoiados projetos de desenvolvimento de tecnologias da biomassa lignocelulósica e, inclusive, no conceito de biorrefinaria. Nesse aspecto, seguindo a tendência internacional, serão necessárias medidas governamentais, com incentivos fiscais, empréstimos e *grants*. No estágio atual, no plano federal, é fundamental o apoio a projetos de pesquisa e desenvolvimento, com maiores perspectivas e potencial de geração de inovações tecnológicas, mobilizando recursos não-reembolsáveis de fontes como o Fundo de Tecnologia do BNDES (FUNTEC) e os fundos setoriais da Finep (FNDCT) para projetos cooperativos com universidades e instituições de pesquisas, além de empréstimos e operações de renda variável, dos bancos e agências federais de desenvolvimento, que representem efetivo compartilhamento do risco das iniciativas (privadas). Os investimentos exigidos em pesquisa e desenvolvimento e na eventual implantação de biorrefinarias no país serão provavelmente expressivos, mas parecem justificados

pela perspectiva de elevado retorno social e ambiental. Cabe lembrar, também, que o etanol brasileiro tem sido objeto de um crescente interesse de investidores internacionais e do mercado de capitais, abrindo perspectivas promissoras de captação de recursos via emissão de valores mobiliários, além da possibilidade de captação de recursos por meio da comercialização de créditos de carbono.

No entanto, parece inexorável alguma reestruturação empresarial no setor, prevendo parcerias e até mesmo novas rodadas de fusões e aquisições, em que a intervenção pública será fundamental para incorporação de novos atores oriundos, principalmente, da indústria química brasileira. Parcerias internacionais, a nível de empresas e governos, poderão ser estimuladas, em função das vantagens do etanol da cana e da ascensão do produto a uma posição estratégica no mundo, mas sempre calcadas no princípio de reciprocidade e preservação do espaço já conseguido pelo etanol brasileiro.

Referências Bibliográficas

- “Blindness on biofuels”. *The Washington Post*, Opinion, 24.1.2007.
- CEC. “Communication from the Commission: an EU strategy for bio-fuels”. Bruxelas: Commission of the European Communities, 2006.
- CGEE. “Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo”. *Relatório final*, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos CGEE-Nipe/Unicamp, dezembro de 2005.
- CHEMICAL ENGINEERING. “The path to biorefineries”. Disponível em: <www.che.com>, p. 27-30, abril de 2006.
- CNNMoney.com. *Biorefinery breakthrough*. Disponível em: <<http://www.cnnmoney.printthis.clickability.com/pt/cpt?action=cpt&title=Biorefinery+Breakthrough+-...>>. Acesso em: 16.8.2006.
- DoE. MultiYear Program Plan 2007-2012, Office of the Biomass Program, Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, 31 de agosto de 2005.
- _____. *Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: a joint research agenda*. A research roadmap resulting from the Biomass to Biofuels Workshop, 7-9 dez. 2005. Rockville, Maryland, Department of Energy, jun. 2006.
- eBIO. Revision of Directive 2003/30, EC – Priorities for the bioethanol sector, European Bioethanol Fuel Association, European Parliament. Hearing on “Strategy for Biomass and Biofuels”. Disponível em: <www.ebio.org>, jun. 2006.
- “Ethanol”. *The Economist*, print edition, 13 de julho de 2006.

INOVAÇÃO UNICAMP. “Brasil tem vantagem tecnológica em etanol, mas está em vias de perdê-la, diz Prêmio Nobel. Presidente da Embrapa concorda”. 21.11.2005. III Conferência de Ciência, Tecnologia e Inovação, 21.11.2005. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/report/news-IIIconferencia2.shtml>>. Acesso em: 15.8.2006 (2005).

_____. “Principal especialista em obtenção de etanol a partir dos resíduos de cana diz quais são as vantagens do Brasil e como mantê-las”. 24.7.2006. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/report/entre-rossell.shtml>>. Acesso em: 15.8.2006 (2006).

_____. “Produtores de óleos vegetais freiam investimentos em biodiesel: preços em retração e demanda concentrada geram incertezas”. 7.8.2006. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/report/le-biodiesel-etanol.shtml>>. Acesso em: 15.8.2006 (2006a).

_____. “Interesse por etanol cresce no mundo desenvolvido; Brasil pode aumentar exportações para os EUA e para União Européia”. 17.4.2006. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/report/le-exportetanol.shtml>>. Acesso em: 15.8.2006 (2006b).

_____. “Viabilidade comercial da produção de etanol de celulose passa por engenheirar organismos; Craig Venter quer criar uma só para isso!”. 4.9.2006. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/report/le-etanol-techreview.shtml>>. Acesso em: 9.9.2006 (2006c).

_____. “Oxiten apresenta projeto ao BNDES para construir biorrefinaria; quer obter etanol a baixo custo para fabricar produtos químicos”. 7.8.2006. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/report/news-oxiten060807.shtml>>. Acesso em: 15.8.2006 (2006d).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook*, 2005.

IPC. *WTO disciplines and biofuels: opportunities and constraints in the creation of a global marketplace*. IPC Discussion Paper, International Food & Agriculture Trade Policy Council (IPC) & Renewable Energy and International Law (REIL), out. 2006.

KAMM, B., KAMM, M., GRUBER, P. (eds.). *Biorefineries – biobased industrial processes and products: status quo and future directions*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.

MARTINES-FILHO, João, BURNQUIST, Beatriz L., VIAN, Carlos E. F. “Bioenergy and the rise of sugarcane-based ethanol in Brazil”. *Choices*, 21 (2), 2nd quarter 2006 (publicação da American Agricultural Economic Association). Disponível em: <www.choices-magazine.org>.

NEXANT. “Liquid biofuels: substituting for petroleum”. Q206_00806.001, Nova York, abril de 2006.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. “Biomass Research – What is a Biorefinery?” Disponível em: <<http://www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html>>. Acesso em: 15.8.2006.

PEREIRA JR., Nei. “Biotecnologia de materiais lignocelulósicos para a produção química”. EQ/UFRJ, Prêmio Abiquim de Tecnologia 2006.

TECHNOLOGY REVIEW. “Redesigning life to make ethanol”. Technology Review – an MIT Enterprise. Disponível em: <http://www.technologyreview.com/printer_friendly_article.aspx?id=17052>. Acesso em: 5.9.2006.

ROQUETTE. *Cereal based biorefinery*. Apresentação feita na “Renewable Resources and Biorefineries Conference”, York, UK, set. 6-8, 2006.

USDA. “Bioenergy, US Department of Agriculture, Office of Energy Policy and New Uses”. Apresentação feita na “Renewable Resources and Biorefineries Conference”, York, UK, set. 6-8, 2006.

WONGSTCHOWSKI, Pedro. *A indústria química: riscos e oportunidades*. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.

Sites consultados

Abengoa Bioenergy. <<http://www.abengoabioenergy.com>>.

Agência Estado. <<http://www.ibps.com.br/index.asp?idnoticia=3249>>. Acesso em: 12.6.2006.

Biorefinery concepts. <<http://www.biorefinery.nl/biorefinery-concepts/>>.

Carbono Brasil. <<http://www.carbonobrasil.com/textos.asp?tId=62&idioma=1>>.

eBIO – European Bioethanol Fuel Association. <<http://www.ebio.org/home.html>>.

RFA – Renewable Fuel Association. <<http://www.ethanolrfa.org/>>.

Nile – New Improvements for Lignocellulosic Ethanol. <<http://www.nile-bioethanol.org/>>.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. <<http://www.nrel.gov/>>.

Unica – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. <<http://www.portalunica.com.br>>.

USDA – Department of Agriculture. <<http://www.usda.gov/wps/portal/usdahome>>.

US DoE – Department of Energy. <<http://www.energy.gov/>>.